

больше глубина проплавления, степень перемешивания и переход элементов основного металла в металл наплавки, тем хуже свойства как металла наплавки, так и соединения в целом.

Наиболее полно удовлетворяют требованиям минимальной глубины проплавления основного металла способы плазменной наплавки. Энергетические, тепловые и газодинамические параметры струи низкотемпературной плазмы сравнительно легко регулируются в широких пределах. Это позволяет получать наплавленные покрытия с высокой износостойкостью и стойкостью при работе в химически агрессивных средах.

Для нанесения ремонтных покрытий толщиной 1 – 2 мм и более с небольшой глубиной проплавления основного металла и малым перемешиванием основы с наплавляемым материалом целесообразно применить плазменно-порошковую наплавку. Этот способ наплавки выбран для нанесения слоя антифрикционного и коррозионностойкого материала непосредственно на гребень витка шнека. Для снижения потерь наплавляемого материала при восстановлении гребня применяли вставки из графита, посредством которых формируется «ванна» для расплавленного материала. При наплавке в качестве источника нагрева использовалась плазменная дуга, а присадочным материалом служила проволока  $\text{CuSi}_3$  производства «Lastek».

Для вращения детали и перемещения плазмотрона относительно витка может использоваться токарно-винторезный станок либо какой-нибудь другой механизм, позволяющий следить за шагом витка.

УДК [519.713; 519.711:53]+004.5

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ**

**А. В. Лемзиков**

*Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, Минск*

**С. П. Кундас**

*Международный государственный экологический университет  
им. А. Д. Сахарова, Минск*

**С. В. Медведев, С. В. Гусев**

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,  
Минск*

*Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой программных средств, позволяющих осуществлять моделирование процессов экс-*

*плуатации сборочных единиц с учетом результатов термической обработки деталей.*

Моделирование поведения термически обработанной детали в условиях нагрузки в составе сборочной единицы представляет значительный практический интерес, так как позволяет определить влияние режимов обработки на надежность полученной конструкции. Применение компьютерного моделирования при выборе указанных режимов термической обработки позволяет сократить затраты ресурсов на проведение натурных экспериментов, повысить качество получаемой продукции.

В настоящее время существует ряд программных комплексов, позволяющих осуществлять моделирование процессов термической обработки [1] и механического взаимодействия деталей [2]. Однако ни в одном из них в полной мере не реализованы механизмы совместного решения указанных задач, подразумевающие учет влияния термообработки деталей на эксплуатационные характеристики сборок. Разработка программных средств, обладающих указанной функциональностью, осуществляется в рамках выполнения задания 1.2.02 Государственной программы научных исследований «Информатика и космос».

Для решения поставленной задачи предложена методика моделирования процессов закалки и последующей эксплуатации деталей, состоящая в следующем:

- для моделирования закалки применяется программный комплекс «ThermoSim 2», разработанный в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники. Указанный комплекс позволяет осуществлять моделирование процессов индукционной термической обработки стальных деталей и получать распределения полей напряжений и деформаций, фазового состава и твердости [1];

- результирующее напряженно-деформированное состояние детали после закалки переносится в программный комплекс LS-DYNA (многоцелевой конечно-элементный комплекс разработки Livermore Software Technology Corp), работающий на базе суперкомпьютера «СКИФ» Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. Используемые в LS-DYNA методы решения обеспечивают эффективный расчет сложных задач контакта [2], что позволяет применять его для моделирования процессов эксплуатации деталей в составе сборочных единиц.

Практическая реализация предложенной методики требует разработки алгоритмов и программных средств, позволяющих переносить результаты расчета между моделями, включающими различные конечно-

элементные сетки. Необходимо отметить, что моделирование процессов термической обработки деталей с помощью программного комплекса «ThermoSim 2» может осуществляться на персональных ЭВМ (32-х или 64-х разрядных), но для решения за приемлемое время контактной задачи механического взаимодействия нескольких тел необходимо использовать вычислительные мощности суперкомпьютера. В результате конечно-элементные сетки, используемые в каждом случае, могут не совпадать с точки зрения количества узлов, типа конечных элементов и положения в пространстве. Подобная ситуация продемонстрирована на рис. 1.

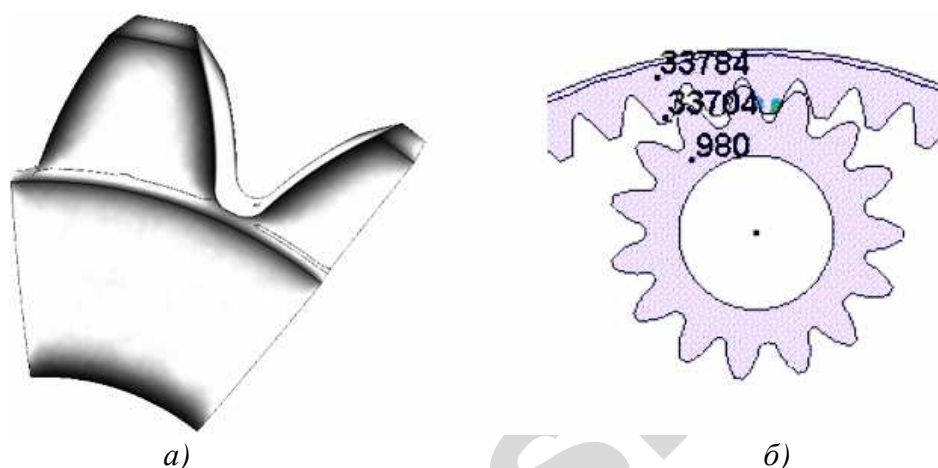


Рис. 1. Отличия в геометрической информации, используемой при моделировании:  
*а* – в программном комплексе «ThermoSim 2»;  
*б* – в программном комплексе LS-DYNA

Как видно на рис. 1, *а*, при моделировании процесса термической обработки в «ThermoSim 2» для уменьшения вычислительной сложности решаемой задачи была выделена симметричная часть детали (полтора зуба шестерни), что позволило значительно ускорить расчет и увеличить его точность за счет уменьшения размера конечных элементов. В то же время при моделировании контактной задачи в LS-DYNA (см. рис. 1, *б*) используется полная геометрия деталей в связи с необходимостью анализировать полный цикл нагрузки.

В настоящее время в рамках «ThermoSim 2» добавлен программный модуль, позволяющий «доставлять» недостающую геометрию (и полученные в ходе моделирования поля температур, распределение структурных составляющих и напряженно-деформированное состояние), используя заданную пользователем информацию об особенностях симметрии детали.

Следующим направлением разработки является перенос информации о результирующих напряжениях, возникающих при закалке (тензор на-

пряжений, вычисляемый в программном комплексе «ThermoSim 2»), на конечно-элементную сетку, используемую в LS-DYNA (в область INITIAL\_STRESS\_SOLID входного файла указанного программного комплекса). При этом необходимо учесть, что в общем случае могут применяться разные типы трехмерных конечных элементов (например, 4-х или 8-миточечные, с различными степенями аппроксимирующего полинома), узлы которых не совпадают в пространстве. Решаемая при этом задача интерполяции обладает определенной вычислительной сложностью и требует оптимизации программного кода для эффективного решения за приемлемое время.

После решения указанных задач появится возможность проводить моделирование процессов эксплуатации сборочных единиц с учетом влияния различных режимов термической обработки деталей, что в перспективе позволит оптимизировать указанные процессы, повысить износостойкость деталей и надежность конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лемзиков, А.В. Программный комплекс «ThermoSim 2» для моделирования процессов индукционной закалки / А.В. Лемзиков, Д.Г. Иванов; под ред. П.С. Гурченко // сб. трудов Международной научно-технической конференции «Теория и практика энергосберегающих процессов в машиностроении». 19-21 ноября 2008 г. – Минск: ОСПИ., 2008. – С. 175 – 179.
2. LS-DYNA. Keywords User's Manual. Version 971. – 2005. – LSTC. – 1862 p.

УДК 544.542.1; 621.357.9

### ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ СПЛАВОВ Zn-Ni, ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ В ПОЛЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. Г. Валько, И. И. Кургузенкова

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы*

*Проведено исследование элементного состава Zn-Ni покрытий, полученных из нейтрального электролита в поле рентгеновского излучения. Установлено, что действие рентгеновского излучения в процессе электроосаждения Zn-Ni покрытий способствует увеличению содержания никеля в сплаве. Методом полного факторного эксперимента получены зависимости содержания никеля от плотности катодного тока и мощно-*